

# 国際開発研究フォーラム

FORUM OF INTERNATIONAL DEVELOPMENT STUDIES

研究論文

ARTICLE

## LCAによる中国紙リサイクルの 環境負荷に関する定量的評価

— 広東省の塗工白板紙を事例として —

魯 希

46-6

名古屋大学大学院国際開発研究科

GRADUATE SCHOOL OF INTERNATIONAL DEVELOPMENT  
NAGOYA UNIVERSITY

# LCAによる中国紙リサイクルの 環境負荷に関する定量的評価

— 広東省の塗工白板紙を事例として —

魯 希\*

## Abstract

Paper recycling is recommended for economic reason in China, but it may be not worth the candle because recycling activities will discharge various kinds of pollutants that damage the environment. Therefore, two questions need to be verified: 1) What kinds of environmental impacts are caused by recycling; 2) From the standing point of environmental conservation, should we promote paper recycling? This research investigates on the case of paper making enterprises in Guangdong province, China. We conducted a quantitative evaluation on environmental impacts of a life-cycle of 1 ton coated white paper board. The life-cycle includes processes of materials acquisition, manufacturing, disposal, recycling and transportation. Then, basing on the result of LCA, we set three scenarios as “non-recycling”, “recycling once” and “recycling multiple times” for simulation analysis.

The conclusions are as follows:

1) Under the premise of 40% paper recycling rate, the order of priority to reduction of environmental pollution is: “recycling multiple times”, “recycling once”, “non-recycling”. That means promoting paper recycling is recommended for environmental conservation.

2) Promoting paper recycling has positive effects of restraining environmental pollution in following categories: energy crisis, global warming, acidification, eutrophication, waste problem, photochemical oxidants.

3) When promoting paper recycling, pollution prevention measures must be strengthened in categories of resource depletion, atmospheric pollution and water pollution.

**Keywords:** *Paper recycling, LCA, Environmental impacts*

## 1. はじめに

近年、飛躍的な経済成長の一途を辿る中国では、自然資源の枯渇の問題が現実味を帯びるようになり、資源やエネルギーの供給不足問題がしばしば表面化している。2002年以降、紙と板紙の消費量は著しく増加傾向にある。2009年に初めてアメリカを超え、世界一位となった（中国造紙協会2012：25）。その結果、紙リサイクル（本稿では「古紙をパルプ化して紙製品を生産するというマテリアルリサイクル」を意味する）を通じて、森林資源の保護、省エネの視点からの環境負荷の低減効果が期待されるようになった。2004年より紙資源使用総量における古紙が

\*名古屋大学国際開発研究科

占める割合は5割を超えており、年々増加の傾向を示している。2004年の52%から2011年には62%に至った（中国造纸協会2012：139-140）。つまり、紙製品の生産には、天然原料<sup>1</sup>より、再生原料（古紙）のほうが利用されていることが分かる。

しかし、リサイクル工程は、通常の生産工程と同じように、水域、大気、土壌へ各種汚染物質の排出源となり、却って環境負荷がかかるという指摘もある。紙リサイクルによって具体的にどのような環境負荷が起こるか、それがどのような環境負荷の低減効果を実現できるか、という課題に対して環境負荷の定量的評価を行う必要がある。

環境負荷の定量的評価にかかわる研究方法としてはいくつかの方法があるが、その中でも特にLCAが推奨されている。LCAは、製品に関する資源の採取から製造、使用、廃棄、輸送など全ての段階を通して、「ゆりかごから墓場まで」の環境影響を定量的、客観的に評価する手法である。Windsperger（2002）によると、エネルギーの生産などのプロセスを紙製品のLCAの評価システム内に設定することが分析結果に対して重要な影響を与えることが分かった。そのため、生産プロセスだけではなく、製紙工程の上流と下流の各プロセスに投入された必要なエネルギーの生産過程を含めて評価しなければならない。

古紙に関するLCAの先行研究を考察すると、研究の年代や評価のシステムバウンダリーなどの差異によって、リサイクルによる環境負荷についての分析結果も異なる。Karna（1994）によるヨーロッパ中部の新聞紙を対象としたライフサイクルアセスメント（以下、LCA）の研究例では、紙リサイクルは、紙ごみを燃やして発電する処理方法より環境負荷が大きいことを検証した。また、Nigel（1996）は、紙リサイクルは、古紙の回収、分類、再生利用のそれぞれの過程において大量のエネルギーを消費し、汚染物質を排出するため、総合的に言えば天然資源の利用より環境負荷が大きいと指摘した。つまり、紙リサイクルが進むほど、究極的に言えば環境負荷を加重する。ただし、これらは90年代の研究となるため、ヨーロッパの当時のリサイクル技術に限定した分析結果だと考えられる。

それに対して、砂金（1997）は、プリントコピー用紙の生産、輸送、販売、使用、回収、廃棄に至るまでの環境負荷を定量的に評価した結果、CO<sub>2</sub>による地球温暖化、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>による酸性雨、エネルギー消費、資源枯渇等の地球的規模の環境問題に大きな影響はないということが分かった。ただし、すべてのデータが文献から引用されたため、現実味を欠くと考えられる。中澤他（2003）では、古紙配合率の高い再生紙を使用した5種類の環境報告書用紙を対象として、LCA手法を通じて環境影響評価を行った。古紙パルプを100%配合した用紙に比べて木材パルプを配合した用紙は環境に影響が少ないことが明らかになった。これらの先行研究より、日本の紙リサイクルは、環境に悪い影響をもたらさず、さらに環境負荷を低減できるということが分かる。ただし、これらの研究はあくまで日本のリサイクル技術をもとに分析して得た結論であるため、中国の紙リサイクルの現状を解釈するにあたっては不十分である。

一方、中国では、紙製品を対象としたLCAの事例は多いが、紙リサイクルによる環境負荷の評価を行った研究はあまり見られない。呂（2002）は同機能の木製品とプラスチック製品のLCAを通じて、環境保護の視点から見れば紙製品あるいは木製品をプラスチック製品に代替できない

という結論を得た。林（2004）は、LCAを用いて発泡スチロール食品容器・生分解性食品容器の比較研究を行った上で、発泡スチロールのほうが環境にやさしいと指摘した。劉（2008）は段ボール箱のライフサイクルにおける環境負荷因子のインベントリ分析を行って、製品の設計、生産加工、使用と廃棄物処理の各段階に対して改善意見を提案した。これらは、ほぼ同機能製品の比較あるいは製品のエコデザイン的设计を目的としたものである。それから、趙（2006）は浙江省の白板紙を対象として生産段階の環境負荷をLCAで評価し、古紙パルプの配合率がそれぞれ87.5%と45.0%の場合の環境への影響を比較した。分析結果より、配合率は高いほうが、エネルギーと資源（水、木材）の投入、CO<sub>2</sub>とSO<sub>2</sub>の排出という環境負荷が軽いことが分かった。ただし、この研究では、古紙からの製紙工程のみ評価したため、古紙からパルプを製造するプロセス、古紙の回収過程および輸送プロセスを含めた全体的な環境負荷の状況が不明のままであった。

そこで本稿では、中国の広東省にある製紙企業の事例を用いて、リサイクルなし、一回循環リサイクル、複数回循環リサイクルの3つのシナリオを想定した上、LCA手法を用いて、1tあたりの塗工白板紙の素材調達、製紙、廃棄、古紙回収と輸送の各段階を含むライフサイクルにおける環境負荷を定量的に評価した。それに加えて、各シナリオの比較分析を通じて、リサイクル活動による環境負荷の低減効果について検討した。

## 2. LCA分析の枠組み

### 2.1 評価対象について

広東省の塗工白板紙を評価対象にした理由として2つが挙げられる。第1に、中国の製紙産業、その中でも紙リサイクル産業が東部沿海部に集積している現状の中、企業数が最も多いのは広東省（2010時点で全国総数の18%）である（中国造纸协会2012：11）。第2に、中国国内の再生紙は主に包装用紙と新聞紙の2種類である。再生紙の包装用紙は、段ボール原紙、紙器用板紙、塗工白板紙と非塗工白板紙に分類されるが、そのうち、塗工白板紙の生産量が最も多い<sup>2</sup>。従って、広東省の塗工白板紙は中国紙リサイクルを考察することにあたり、適切な代表例として考えられる。

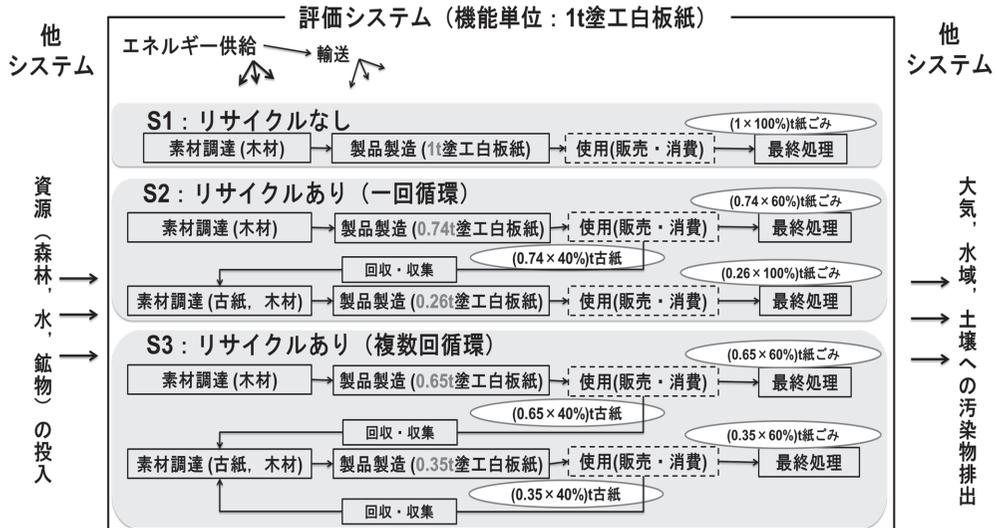
### 2.2 評価システムについて

本稿では、「1t塗工白板紙」を機能単位として、そのライフサイクルにおける主要な環境負荷因子（資源・エネルギーの投入または環境汚染物質の排出）の状況を考察した。

図1に示したように、塗工白板紙のライフサイクルは、主に「素材調達」、「製品製造」、「使用（販売・消費）」、「回収・収集」、「最終処理」の五段階から構成される。そのうち、「使用」段階（破線の枠中）では、工場から各小売商店への運輸過程でCO<sub>2</sub>などの大気汚染負荷因子が発生すると考えられるが、これらの排出量は少なく、排出先が分散している。故に、「使用」段階での環境負荷をゼロと想定する。

また、「素材調達」については、木材と古紙をそれぞれ原料とした2ケースを考えている。ただし、

図1 塗工白板紙のLCA評価システムおよびシナリオの想定



(出所) 筆者作成

古紙を主要な原料に白板紙を生産する場合は、木材を原料に製造した木材パルプ (少量) を古紙パルプに配合するため、「素材調達 (古紙, 木材)」と表示する。古紙に木材パルプを配合する理由は、古紙があくまで使用済みの材料であり、脱インキなどの作業を通じてパルプ化すると繊維の品質が劣化してしまうおそれがあるからである。100%の古紙原料で板紙を生産することは理論的には可能であるが、大量かつ高額の化学薬品を添加しなければならないため、実際には、古紙と木材パルプを配合して生産している。

各段階については、具体的に下記の各プロセスで環境負荷因子を考察する。

- (1) 素材調達 (木材) 段階: 林材を木材チップに生産するプロセスを考察する。ただし、森林の保育, 木材の伐採や保管, 伐採作業場所から工場までの輸送プロセスを本研究では考慮しない。
- (2) 製品製造 (木材原料より) 段階: 木材チップを木材パルプに製造するプロセスと木材パルプからの製紙プロセスを考察する。ただし、木材チップの輸送 (木材加工工場からパルプ製造企業までの輸送) と、木材パルプの輸送 (パルプ製造企業から製紙企業まで) は、本システムで考えないものとする。
- (3) 素材調達 (古紙, 木材) 段階: リサイクルの場合は, 2種類の原料を同時に使用する。そのため, この段階は古紙の「回収・収集」段階と木材原料の調達段階を含む。
- (4) 製品製造 (古紙と木材原料より) 段階: この段階では, 古紙から紙パルプを製造して塗工白板紙を生産するプロセスを考察する。
- (5) 最終処理段階: 中国には焼却施設がまだ少ないため, 都市ごみの80%以上が埋立されている (中国国家统计局2011: 171)。それ故, この段階では, すべての紙ごみは80%が埋立, 20%が焼却されると測定する。また, ごみを最終処分場に輸送するプロセスも考慮する。

## 2.3 シナリオの想定

シナリオ分析のために、まずは仮定条件を説明しておく。

ア) 生産、輸送、回収などの各段階（プロセス）において、物質（板紙や古紙）の重量損失はないこととする。

イ) リサイクル用の古紙原料は、製品と同じような種類（塗工白板紙）と仮定する。

ウ) 生産技術は企業によってそれぞれであり、すべての企業、すべての生産工程を調査して環境負荷の評価を行うことは非現実的である。本稿では広東省を代表する2社の製紙企業をLCA調査の対象とした。その2社（A社とB社を匿名する）は中規模企業であり、2010年時点でそれぞれ50万tと10万tの塗工白板紙の年平均生産量を有し、広東省に立地した453社の紙と板紙の製紙企業の中で、代表的なケースとして考えられる。木材原料の製紙プロセスは、事例としたA社（木材を原料に生産する製紙企業）の技術に準じ、古紙原料の製紙プロセスは、事例としたB社（古紙を原料に生産する紙リサイクル企業）の技術に準ずる。つまり、木材原料のみの生産工程には、A社の実測平均値を採用し、1tあたりの板紙を生産するごとに、0.85tの木材パルプを原料にすることと仮定する。一方、リサイクル工程の古紙配合率は、B社の実測平均値を採用する。1tあたりの板紙を生産するごとに、1.15tの古紙と0.17tの木材パルプを原料にすることと仮定する。

エ) 古紙回収率は年平均値の40%と仮定する。

これらを前提として、図1で示したように、同機能単位（1t塗工白板紙）の3つのシナリオを想定している。

シナリオ1（以下、「S1」）は、機能対象が木材原料から生産されて、使用された後、リサイクルなしで100%がごみとして処理される（80%埋立、20%焼却）というライフサイクルを表した。

シナリオ2（以下、「S2」）では、機能対象の生産工程には一回のリサイクル活動を含むことを想定する。ただし、リサイクル用の古紙は、すべて木材原料から作られた製品から発生したと考える。そこで、古紙回収率の40%を考慮すれば、1t製品のうち、0.74tが木材を原料に、0.26tが古紙と木材を原料に生産されるはずである。具体的に説明すると、すべて木材を原料とする板紙が1t生産され、0.4tが回収される。リサイクル工程においては、1.15tの古紙と0.17tの木材パルプから1tの板紙が製造されるため、回収された0.4tの古紙を使うと、 $(0.4 \div 1.15 =)$  0.35tの板紙が製造される。1回リサイクルの場合では、 $(1 + 0.35 =)$  1.35tの板紙が製造されるが、そのうち、1tが木材のみから、0.35tが古紙と木材から作られることになる。これらを1tあたりに直すと、前者が $(1 \div 1.35 =)$  0.74t、後者が $(0.35 \div 1.35 =)$  0.26tとなる。さらに、木材原料からの0.74tの製品が使用された後、40%は回収される一方、60%は処理される（うちの80%が埋立、20%が焼却される）ことになる。古紙と木材原料からの0.26tの製品は、100%が処理される（うちの80%が埋立、20%が焼却される）。

シナリオ3（以下、「S3」）では、複数回のリサイクル活動を考える。つまりリサイクル用の古紙は、木材原料からの製品だけではなく、古紙原料からの製品も回収・調達されると想定する。S1とS2と同じように、1tの板紙を生産し、0.4t（回収率40%）の古紙が回収できる。リサイクルを複数回循環していくために、古紙と木材から作られたすべての板紙は、そのうちの40%が

回収されてリサイクル工程に再投入されるべきである。仮に木材を原料とする板紙を $a$ t、古紙と木材を原料とする板紙を $b$ t生産するとすれば、 $(0.4a+0.4b)t$ 板紙が回収され、リサイクル工程に投入される。リサイクル工程においては、 $1.15t$ の古紙と $0.17t$ の木材パルプから $1t$ の板紙が製造されるため、回収された $(0.4a+0.4b)t$ の古紙を使うと、 $((0.4a+0.4b) \div 1.15)t$ の板紙が製造される。つまり、 $(0.4a+0.4b) \div 1.15=b$ が成り立つ。また、 $a+b=1$ を仮定して前述の数式を解くと、「 $a=0.65$ 、 $b=0.35$ 」の答えが得られる。そのため、複数回リサイクルのS3の場合では、 $1t$ あたりの板紙が製造されるが、そのうち、 $0.65t$ が木材のみから、 $0.35t$ が古紙と木材から作られることになる。また、いずれの生産工程からの製品とも60%がごみとして処理される（うちの80%が埋立、20%が焼却される）。

このように想定したシナリオで、 $1t$ あたりの塗工白板紙のライフサイクルによる主要な環境負荷因子による環境影響を評価した。

### 3. インベントリ分析

#### 3.1 データの説明

ここで、インベントリデータの収集と算定について説明しておく必要がある。各評価プロセスによるデータ情報の概観は表1に示している。

表1 評価対象プロセスおよびインベントリデータの情報

段階	対象プロセス	必要なデータ	データの出所
素材調達 (木材)	木材チップの生産	製造工程におけるLCAインベントリリスト	Yan et. al (2007) から引用
製品製造 (木材より)	木材パルプの製造	資源・エネルギー投入量および汚染物の排出量	製紙産業の規定や汚染物発生係数・排出係数のマニュアルによる規制の上限値を採用
	木材パルプからの製紙	資源・エネルギー投入量 汚染物排出量	実地調査によるA社の生産日報に基づき筆者が各項目の平均値を算出 A社の環境影響評価書から引用
素材調達 (古紙, 木材)	回収会社から製紙会社への古紙輸送	距離 (測定) エネルギー投入量および大気汚染物質の排出量	Google 地図の最適ルートより筆者が距離を概算 『中国エネルギー年鑑2012』と郭 (2003) によるエネルギー原単位と排気の排出係数を参照して、筆者が各項目を算出
製品製造 (古紙と木材より)	木材パルプの製造	資源・エネルギー投入量 汚染物排出量	実地調査によるB社のパルプ製造ワークショップの生産日報に基づき筆者が各項目の平均値を算出 B社の環境影響評価書から引用 (パルプ製造ワークショップ部分)
	古紙のリサイクル (古紙パルプと紙製造を含む)	資源・エネルギー投入量 汚染物排出量	実地調査によるB社の抄紙工程ワークショップの生産日報に基づき筆者が各項目の平均値を算出 B社の環境影響評価書から引用 (抄紙工程製造ワークショップ部分)
最終処理	収集拠点から埋立場/焼却場へのごみ輸送	距離 (測定) エネルギー投入量および大気汚染物質の排出量	Google 地図の最適ルートより筆者が湛江市の9地区から湛江市生活ごみ処理場への平均距離を概算 『中国能源年鑑』とGuo (2003) によるエネルギー原単位と排気の排出係数を参照して、筆者が各項目を算出
	埋立過程	汚染物排出量	Zhuang (2007) から係数を参照して算出
	焼却過程	汚染物排出量	Zhuang (2008) から係数を参照して算出

(出所) 筆者作成

まず、事例調査のデータは、筆者が2013年6月から7月の間に、広東省の製紙会社を訪問したとき入手したものである。数社の製紙会社を見学し、調査を実施したところ、同じ製品を生産する一方で違う原料（木材原料あるいは古紙）を利用する企業は極めて少ないという実情が分かった。なぜなら、企業は常に生産コストの抑制という視点から、天然原料を利用するか、再生原料を利用するかを決める。その結果、どの原料がより経済的効率性を持つかを考え、多くの企業がその原料を利用するわけである。母数としては少ないが、調査した数社のうち、最も代表的な中規模企業の2社（匿名A社とB社）からのデータを採用することとした。A社とB社のいずれも塗工白板紙を主要な製品として生産している企業であるが、前者では木材パルプのみを原料として利用し、後者では古紙を主要な原料に利用している。企業の生産日報、環境評価報告書、環境観測報告書を参照し、社長らへの聞き取り調査などからデータを収集した。具体的には、汚染物の排出状況について、中国の工場にはモニターをおいていない事情を踏まえて、企業の2010年度の環境評価報告書と定期の環境観測報告書を参考にした。データの同時性を確保するため、生産量や生産技術に関する情報を2010年度の報告書や生産日報から入手した。また、エネルギーを換算する基準、古紙回収過程や輸送過程の環境負荷については、関連文献、規格法令や統計年鑑から引用、推算した。

次に、各プロセスのデータについて詳しく説明する。

#### (1) 素材調達（木材）段階：

中国では、一部の大規模の木材伐採企業は加工廃材を自家でチップ化、精選し、一旦、貯蓄してある程度の量になると積載、チップの購入先（製紙企業）に輸送するようにしている。殆どの企業は加工廃材を収集、積載してチップの購入側に輸送し、購入先（チップ加工企業や大手製紙企業）でチップ化、精選を行い、生産に供する。林材の伐採や輸送についてのデータを把握することは困難なため、本稿では、林材から木材チップを加工する生産工程のみを素材調達段階として考察する。林材から木材チップを生産するプロセスは、「皮剥き」、「乾燥」、「切片」の各工程が含まれている。それから、各工程における主なエネルギー供給は電力であるが、乾燥に必要な蒸気を生産するために、石炭を燃料に使用している。そこで、燕他（2007：10-12）を参照し、生産工程における投入された資源とエネルギー、大気、水系および土壌に排出された汚染物質の量を引用して、1m<sup>3</sup>あたりの乾燥木材チップの製造工程におけるインベントリリストを導出した。

#### (2) 製品製造（木材原料より）段階：

木材パルプの製造プロセスについては、塗工白板紙を生産する場合、一般的に、機械的なパルプ工程と化学的なパルプ工程との組み合わせで製造されるBCTMP（Bleached Chemi-Thermo-Mechanical Pulp）を原料に使用している。具体的な製造工程は、木材チップをカ性ソーダなどの化学薬品で煮込んで、繊維を取り出して（蒸解）、洗浄、漂白、選別して紙パルプを作る。パルプ製造工程におけるエネルギー供給は主に電力である。

本稿で扱う汚染源は中国国家发展改革委员会（2006）か中国国家环境保护局（2010）<sup>3</sup>のどちら

かで規制対象となっている。本稿では、それぞれの汚染源に対して許容上限値を採用した。中国国家发展改革委員会（2006：11-13）では、パルプ製紙企業が異なる生産設備（技術）によるエネルギー、水資源の投入量の上限值（法律の許容範囲）を規定した。それで、1tあたりBCTMPの製造に必要な燃料用石炭、電力消費と水や木材の資源投入に関する情報を参照して、それらの項目の上限值（法律の許容範囲における最大値）を採用した。また、中国国家环境保护局（2010：633-667）で掲載されたパルプ製造工程における廃水量、CODやBODなどの発生係数を参照して、BCTMPの製造プロセスに排出される水系汚染物を推定した。

他方、木材からの製紙プロセスについては、前述した、筆者が現地調査した結果を採用した。具体的には、「原材料の破碎」、「粗選」、「脱水」、「乾燥」、「塗工」の工程が含まれる。製紙会社A社には、製紙ワークショップと、抄紙工程に必要な乾燥用の蒸気を供給する動力ワークショップがある。動力ワークショップで石炭を燃やして蒸気を生産し、パイプを通じて各ワークショップに分配する。そこで、各ワークショップの生産日報（2010年度）から板紙の生産量、原料の使用量、用水量、蒸気と電気消費量などを得て、1tあたりの板紙を生産するための資源とエネルギーの投入量を算出した。また、各種の汚染物排出状況については、華南環境科学研究所が作成した企業の中国环境保护部华南环境科学研究所（2010）<sup>4</sup>から参照した。

### （3）素材調達（古紙、木材）段階：

筆者が調査した製紙会社B社は広東省の陽江市に所在し、常に広東天保再生資源発展有限公司（以下、「天保」）から古紙を購入している。それ以外にも、少量の古紙が近所の回収拠点や住宅区から人力車で回収されているが、全部の古紙が「天保」から購入したと仮定して、輸送プロセスで発生する大気汚染を推算した。具体的な方法は以下の通りである。「天保」は各地の古紙を集めてから、広州市にある作業場に運び、集中的に選別する。その作業場からB社への片道距離は250.9kmである。そして、古紙輸送用トラックの積載量が20t、燃費が約2.5km/Lである（密度0.83kg/Lの軽油を使用する）。そのため、1tあたり古紙の軽油消費量が $(250.9 \times 2(\text{往復}) \div 2.5 \times 0.83 \div 20 =)$  8.33kgとなる。1kgあたり軽油のエネルギー原単位は1.4571kgceである（中国国家发展改革委員会2012:353）。そこで、1tあたりの古紙を運送するエネルギー投入量は12.14kgceとなる。さらに、トラックの排気量は車両の燃費や実際の走行状況によって違いがあるが、ここでは、通常の場合を考えると、谷（2009：62）で纏められた自動車の排気による汚染物の平均排出係数を用い、1tあたりの古紙を輸送する際に排出される各種大気汚染物の量を計算した。

### （4）製品製造（古紙と木材原料より）段階：

古紙と木材パルプを板紙に生産する具体的なプロセスは3段階を含む。まず、古紙を「スクリーン」、「叩解」、「脱インキ・漂白」、「清浄」の各工程を通じて、抄紙の原料に製造する。そして、BCTMPを「破碎」、「粗選・除砂」、「脱水」の各工程を通じて、抄紙の原料に製造する。最後に、両種の原料を一定の比例で配合して抄紙する。これらのすべての工程における資源の投入量（原料、用水や燃料の消費量）は、筆者が現地調査したB社の生産日報（2010年度）から抜粋した。

そして、1tあたりの板紙を生産するための資源とエネルギーの投入量を算出した。また、各種汚染物の排出量については華南環境科学研究所が作成した該当企業の中国环境保护部华南环境科学研究所（2010）を参照した。

**(5) 最終処理段階：**

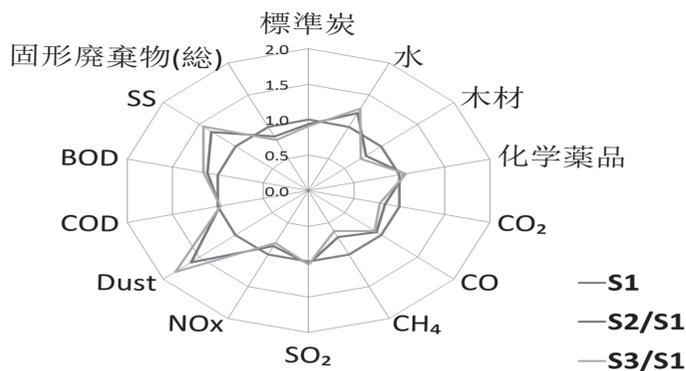
各家庭から発生するごみは、所轄の住宅団地の管理会社あるいは町の住民委員会（日本の町自治会に相当する組織）で収集されて、市営ごみ処理場へ輸送されている。管理会社あるいは住民委員会が各家庭からごみを収集する時は、一般的に人力車を利用するため、環境への影響が少ない。収集されたごみは、住宅団地あるいは町の臨時場所で保管されて、定期的にトラックでごみ処理場に輸送される。この過程では、トラックの排気による大気汚染を招く。

本稿では、塗工白板紙が生産地で使用、廃棄されると仮定する。つまり、A社が生産した塗工白板紙は、最後に紙ごみとしてA社がある湛江市の市営ごみ処理場（埋立施設と焼却施設を保有）で処理されることとする。輸送用トラックは、燃費が5km/Lある積載量8tの中型軽油トラック（密度0.83kg/Lの軽油を使用）である。湛江市の9地区から市営ごみ処理場への平均距離（45.19km）を採用すると、1tあたりのごみを輸送するために、 $(45.19 \times 2(\text{往復}) \div 5 \times 0.83 \div 8 =)$  1.88kgの軽油がかかる。(3)節で述べたように、中国国家发展改革委员会（2012:353）と谷（2009:62）より、エネルギー原単位と自動車の排気による汚染物の平均排出係数を引用して、1tあたりのごみの輸送時の汚染物の量を計算できる。また、庄（2007:38-58）は、1tあたりの都市ごみを埋立処理（浸出水10%）と焼却処理（焼却灰4%、残渣20%）する場合に、それぞれのインベントリを引き出した。そのデータを参照して、紙ごみは80%が埋立、20%が焼却されるといった配分で、1tあたりのごみを最終処理にするためのインベントリを推算する。

**3.2 インベントリによるシナリオの比較**

図2は前節で述べた3つのシナリオによる環境負荷因子のインベントリ比較の結果を示している。規定値としてS1の各負荷因子量をすべて1にして、S1で割ったS2とS3のレーダー図を作った。

図2 1tあたり塗工白板紙のインベントリによるシナリオ比較



(出所) 筆者作成

結果によると、S2/S1、S3/S1の数値が1より大きい項目は、水、化学薬品、SO<sub>2</sub>、Dust、生物化学的酸素要求量（以下、「BOD」）と浮遊物質（以下、「SS」）である。つまり、これらの項目では、リサイクル活動を行った方が、環境負荷が大きいと言える。その以外の項目では、リサイクルによる環境負荷の低減効果が見られる。さらに、水、Dust、BOD、SSでは、S3/S1がS2/S1より大きい結果を示しており、複数回循環リサイクルの方が、一回循環リサイクルより環境負荷が大きいと考えられる。

インベントリの結果では、各シナリオによる環境影響の状況を把握することができたが、リサイクル活動による環境負荷の低減効果を明確には判断できない。それ故、インベントリデータを踏まえて、環境影響評価（以下、「LCIA」）で検討していかなければならない。

## 4. 環境負荷の定量化分析

### 4.1 LCIAの評価システム

LCIAは、「環境負荷の発生を通じて、どのような環境影響がどの程度に発生するかについて、定量的に評価するため」（伊坪他2007：100）の段階として、多岐にわたった環境カテゴリーへの影響状況を単一指標に統合できる手法である。

現状LCIAの評価手法は世界各国で開発されており、主に、EPS 2000、Eco-Indicator 95、Eco-Indicator 99、LIMEなどが挙げられる。それぞれの手法が考慮された環境負荷因子や評価プロセスに異なるところがあるため、一般的に評価目的や対象によって手法を選ぶ。表2で主要な5種類のLCIA手法をまとめた。

表2 LCIA手法の比較

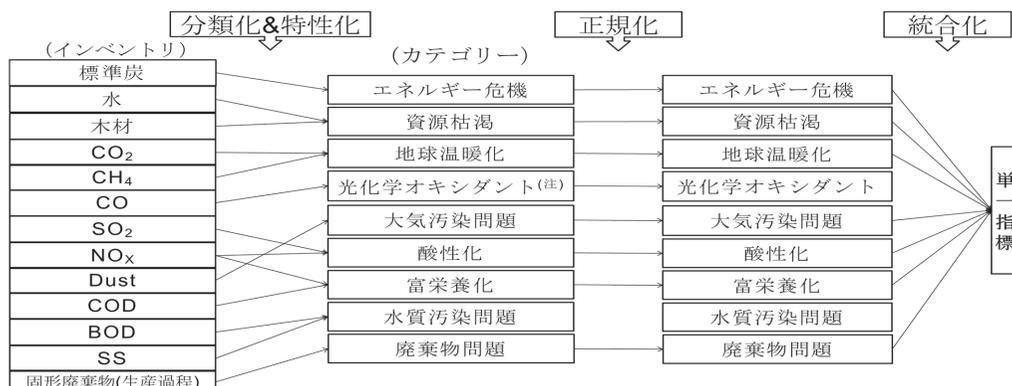
	開発先	年	対象地域	特性化	統合化	特徴
Eco-indicator	オランダCML & Pre 諮問会社	1995, 1999	世界（オランダを拡張）	世界展開	パネル法	専門家の価値判断に基づく
EDIP	デンマーク工業大学	1997, 2003	欧州（デンマークを拡張）	地域依存	DtT法	為政者の目標に基づく
EPS	スウェーデン環境研究所	2000	世界（スウェーデンを拡張）	世界展開	経済評価法	被害者の選好に基づく
LIME	日本産業総合研究所 & LCA 国家プロジェクト	2005, 2011	日本	アジア展開	経済評価法	自国民の選好に基づく
CLCD	中国四川大学 & IKE	2009	中国	地域依存	DtT法, パネル法	為政者の目標に基づく, 専門家の価値判断に基づく

(出所) 筆者作成

本稿で採用するCLCDは四川大学と「亿科环境研究所 (IKE, IT & Knowledge of Environment)」が共同開発した唯一の中国ライフサイクル基礎データベースである。CLCDでは、Eco-indicator, EDIPと同じようにミッドポイント型の手法であるが、主に「環境影響」と「資源」

の側面で評価され、中国の現状を踏まえる正規化と統合化の方法<sup>5</sup>を推薦している。つまり、欧州などの他地域ではなく中国ならではの環境への影響の程度を表す規格値を用いる。その上、中国の事情をよく知っている専門家によって決められたウェイトを使う。図3で示したのは、分類化および特性化、正規化、統合化の3つのステップが含まれたLCIAの仕組みである。

図3 LCIAの仕組み



(注) 人間活動による一酸化炭素 (CO) などの化学物質が大気中で太陽光による光化学反応を引き起こし、オゾン増加の原因となると考えられている。

(出所) 筆者作成

#### 4.1.1 分類化および特性化について

塗工白板紙のライフサイクルにおける環境影響因子を環境毒物化学学会（以下、「SETAC」）の分類化リスト（伊坪他2007：16）を参照して、「エネルギー危機」や「資源枯渇」などの9カテゴリーに分類化した。ただし、この分類について下記の注意事項を説明しておく必要がある。第1に、SETACでは、化石燃料や鉱物資源を「非生物資源の枯渇」として分類されているが、本稿では、エネルギー消費の視点から、そのカテゴリーの名称を「エネルギー危機」に改称した。第2に、固形廃棄物が「土地利用」（埋立場）の問題を引き起こすが、ここでは「廃棄物問題」という名称で表示する。第3に、BODとSSの分類がSETACの分類化リストに含まれていないが、製紙工程では軽視できない環境負荷因子であるため、「水質汚染問題」として後に個別に考察する。

また、特性化では、同一の影響カテゴリーに割り振られた複数の環境負荷物質が該当カテゴリーに及ぼす寄与の違いを考慮する。特性化結果は、各カテゴリーで、どれ程の環境影響をもたらすかを明らかにすることができる。ここでは、「資源枯渇」、「地球温暖化」、「酸性化」と「富栄養化」の4カテゴリーで特性化した。そのうち、「地球温暖化」、「酸性化」と「富栄養化」の特性化係数については、伊坪他（2007：277-282）で採用している係数を用い、いずれも物質の物理・化学的な関係を表して、物質の排出地域や排出時によらず通用できると考えられている。ただし、「資源枯渇」の特性化係数については、中国の現状を踏まえて個別に検討しなければならない。

中国科学院生態研究センターの楊他(2002:69)は、自然資源の持続可能性が反映する視点から、製品の製造により消費された資源の量が該当資源の総量に占めるシェアを「資源消耗係数」と定

義した。そして、中国清華大学の顧他（2006:1954）と燕他（2007:10-11）は、統計年鑑などのデータを用い、各種の鉄鉱石資源の可採年数を計算した上で、鉄鉱石資源を基準として、その可採年数と水、森林資源の可採年数<sup>6</sup>の比を求め、それぞれ2010年時点の水資源、森林資源の「資源消耗係数」とした。計算方法を式(1)と式(2)に示す。

$$\lambda_a = \frac{LF_e}{(G_w \times \varphi - Q - W) / \Delta W} \quad (1)$$

ただし、式中の各符号は以下の通りである。

$\lambda_a$  : 水資源の特性化係数                       $LF_e$  : 鉄鉱石の可採年数  
 $G_w$  : 全国の水資源総量                       $\varphi$  : 水資源有効利用係数  
 $Q$  : 全国国民の人体の水消費量               $W$  : 年間廃水排出量  
 $\Delta W$  : 廃水排出の年間平均増加量 (2000年から2010年の平均値)

式中の $G_w$ は中国統計年鑑より統計した全国水資源総量(2010年度)であり、降水によって地表と地下で形成した水資源の量を指す。 $\varphi$ は水資源総量に対して、供給可能な量を導出するための係数(浄化プロセスや配水施設の現存量から、実現可能な配水上限値を導くための係数である)。中国の水資源利用比例は農業用水が67%で、都市用水(工業、事業と生活用水を含む)が33%である。そのうち、農業用水の利用率(農作物の灌漑に利用された量/水源地からの取水総量)は0.45であり、都市用水の利用率(配水による損失を除いた実際に利用された量/都市配水施設の配水総量)は0.75である。式中の水資源有効利用係数は「 $\varphi = 67\% * 0.45 + 33\% * 0.75 = 0.55$ 」と算出できる。

$Q$ は全国の人口数に1人あたりの平均需要量を乗じて計算されたものであるが、人体の新陳代謝などに消費された水資源を指す。 $W$ は工業系、事業系と家庭系を含む排出された利用後の廃水総量(浄化後に循環再生利用される量は含まない)を指す。 $\Delta W$ は都市廃水排出の年間増加量であり、 $W$ と同じように工業系、事業系と家庭系を含む。

$$\lambda_b = \frac{LF_e}{G_f \times \mu / \left( F - \frac{G'_f \times \mu - G_f \times \mu}{n} \right)} \quad (2)$$

ただし、式中の各符号は以下の通りである。

$\lambda_b$  : 森林資源の特性化係数                       $LF_e$  : 鉄鉱石の可採年数  
 $G_f$  : 全国の森林資源の総量                       $\mu$  : 成熟林の割合  
 $F$  : 工業用木材の年間消費量                       $G'_f$  : 2020年の森林総量の予測値  
 $n$  : 年数 (10年)

式中の $G_f$ と $\mu$ はそれぞれに、全国の森林資源の総量と成熟林の割合を表すが、いずれも中国統計年鑑に掲載した2010年ベースの数値を採用した。つまり、「 $G_f \times \mu$ 」は2010年時点で伐採可能な森林資源の総量を示す。

$F$ は2010年から2020年の十年間で、工業用木材の年間消費量（平均値）を表している。中国では工業用途の木材を確保するために、計画的に植林を実施している。そのため、2020年までの十年間で、伐採された成熟林を新しい植林で補っていると前提した。 $G'_t$ はその前提の下で計算した2020年の森林総量の予測値である。

上記の「資源消耗係数」の計算方法は、現時点の資源埋蔵量（使用可能量）より各資源の消耗速度を反映して、資源の持続可能性を鉄鉱石のそれを基準に評価するものである。筆者は、2010年の各数値を上記の数式に代入して、「資源枯渇」カテゴリーの特性化係数を推算した。

#### 4.1.2 正規化と統合化について

正規化とは「次元が異なるカテゴリーについて比較するための無次元化を行う」ことを言う。CN-2010 (Normalization Reference of China in 2010) では、2010年度の中国環境統計年鑑や国際応用システム分析研究所の統計データベースを基に、各項目の国内総消費量または国内総排出量と、すべての環境負荷因子の総消費（排出）量を求め、両者の比を正規化係数としている。

最後に、正規化した結果にCLCDで推奨されたISCP2009 (Institution of Sustainable Consumption and Production-2009) の統合化ウェイトを乗じて、単一指標に統合する。この結果を通じて、前述設定した紙リサイクルなしのシナリオ (S1) と紙リサイクルありのシナリオ (S2, S3) で引き起こした環境負荷を比較することができる。

2009年、「可持続消費与生産研究所 (ISCP)」が「第2回中国ライフサイクルマネジメント会議」を主催した。会議において、専門家を対象としてアンケートを行い、各環境カテゴリーの重要性を示す係数を得た。そして、アンケート調査の結果を踏まえて階層評価法を用いて、統合化ウェイトを算定した。このように推定したウェイトは、中国独自のパネル法として認められている。

表3では各係数（ウェイト）をまとめた。

表3 特性化、正規化、統合化の係数リスト

カテゴリー	環境負荷因子		特性化係数		正規化係数	統合化ウェイト
	項目	単位	係数	単位		
エネルギー危機	標準炭	kgce	—	—	3.14E-13	2.03E-01
資源枯渇	水	m <sup>3</sup>	1	m <sup>3</sup> -水	6.90E-15	1.66E-01
	木材	m <sup>3</sup>	0.1	m <sup>3</sup> -水		
地球温暖化	CO <sub>2</sub>	kg	1	kg-CO <sub>2</sub>	1.20E-13	1.74E-01
	CH <sub>4</sub>	kg	23	kg-CO <sub>2</sub>		
酸性化	SO <sub>2</sub>	kg	1	kg-SO <sub>2</sub>	4.57E-11	1.03E-01
	NO <sub>x</sub>	kg	0.7	kg-SO <sub>2</sub>		
大気汚染	Dust	kg	—	—	6.99E-11	7.80E-02
富栄養化	COD	kg	1	kg-COD	8.06E-11	7.90E-02
	NO <sub>x</sub>	kg	6.5	kg-COD		
廃棄物問題	固形廃棄物 (生産過程)	kg	—	—	2.22E-10	8.50E-02

(注) 標準炭 (Standard Coal) は、熱量を表す値である。中国では、単位量の製品や額を生産するのに必要な電力や燃料の消費量を標準炭に換算して、常にエネルギー指標として見なされている。

(注) 製紙に関連した汚染源のみを取りあげたので、表に挙げた統合化ウェイトは合計して1にならない。

(出所) CLCDを基礎に筆者作成

## 4.2 LCIAによるシナリオの比較

### 4.2.1 統合指標の比較

表4 シナリオ別の1tあたり塗工白板紙におけるLCIA統合化結果

カテゴリー	S1	S2	S3
エネルギー危機	3.84E-10	3.60E-10	3.52E-10
資源枯渇	4.63E-11	5.47E-11	5.77E-11
地球温暖化	6.38E-11	5.25E-11	4.85E-11
酸性化	2.69E-10	2.67E-10	2.66E-10
大気汚染	9.18E-11	9.18E-11	1.68E-10
富栄養化	8.07E-10	7.06E-10	6.71E-10
廃棄物問題(生産過程)	2.15E-09	1.95E-09	1.88E-09
合計	<b>3.81E-09</b>	<b>3.48E-09</b>	<b>3.44E-09</b>

(注) ウェイトを付けて統合した数値であるため、数値に単位はない。

(出所) 筆者作成

表4で示したように、7カテゴリーで指標を統合した結果は、「S1>S2>S3」となる。つまり、リサイクルを行った方が、環境負荷が低くなる。さらに、複数回循環リサイクルの方が、一回循環リサイクルより環境負荷が低い。この結果から、紙リサイクルを促進すればするほど効果的だと言える。ただし、シナリオ間の差異を見てみると、S1がS2より3.31E-10 (S1の9%程度)、S1がS3より3.70E-10 (S1の10%程度)、S2がS3より3.84E-11 (S2の1%程度) 多いという結果となり、いずれの差も大きくない。それ故、環境負荷の低減効果を期待する場合、現状の紙リサイクルを促進する戦略だけでは不十分である。

そこで、リサイクルを促進すると同時に、現状の環境規制のうち、強化すべき分野を考慮することは有効である。表4の影部分の数値を考察すると、「資源枯渇」カテゴリーにおいては、「S1<S2<S3」となり、リサイクルが進めば進むほど負荷値が大きいことが分かる。言い換えれば、リサイクルしない方が、水と森林を含む自然資源を節約できると考えられる。ただし、リサイクルの原料は主に古紙となるため、ここでの自然資源は水資源のことを指している。古紙のリサイクル工程として、スクリーン、脱インキや清浄の過程では大量な水が必要である。特に脱インキのためには、紙くずを、化学薬品を加えた水の中で長期間の叩解をすることがある。さらに、これらの用水にはたくさんの薬品が残されるため、循環利用率が低い。それ故、リサイクルすればするほど、水資源の消費量が大きくなり、水資源枯渇を加速する一因となる。一方、本研究のシナリオでは、古紙が「自然界にあるものではなく、木材原料の紙製品から生まれたものだ」という考えを前提としているため、森林資源の枯渇にも影響されるという分析結果を得た。実際としては、古紙リサイクルのプロセスのみを考慮する場合もある。その場合には、古紙リサイクルによって森林資源の節約ができると考えられる。

リサイクルなしのS1が複数回循環リサイクルのS3より、一回循環リサイクルのS2が複数回循環リサイクルのS3より、「大気汚染」カテゴリにおける環境負荷値が大きい。このため、大気汚染（ここでは主に生産工程で排出されたダストのことを指す）を抑制するために、リサイクルなし、あるいは一回循環リサイクルの方が推奨される。古紙のパルプ化と製紙工程を含むリサイクルプロセスは、木材原料のパルプ化と製紙工程を含む生産プロセスにより、1.5倍程のダストが排出されている。そのため、統合したところで、S2はS1より微妙な差しか示さないが、S3はS2より著しい差が見えた。

また、「資源枯渇」と「大気汚染」以外のカテゴリにおいては、リサイクルを行う、特に複数回循環リサイクルを行う方が、環境負荷値が少なくなると見られるため、現状リサイクルを推奨すべきだと考えられる。

以上の結果より、リサイクル活動を促進することは、ある程度の環境負荷の低減効果を収められるが、リサイクル工程による水資源の投入量とダストの排出量を抑制するための措置に取り組む必要があると言える。

#### 4.2.2 統合外の個別指標

評価対象のライフサイクルによる主な環境負荷因子のうち、化学薬品、COD、BOD、CO、固形廃棄物（エネルギーの生産などの製品の生産過程以外のプロセスを含む）の項目を前節の統合指標に加算できないため、ここでは、それぞれのインベントリデータを考察する。

表5 1tあたり塗工白板紙における個別項目環境負荷因子について（単位：kg）

		指 標	S1	S2	S3
投入量		化学薬品	156.39	165.27	168.34
排出量	大気へ	CO	36.83	34.36	33.51
		BOD	1.72	1.92	1.99
	水域へ	SS	3.41	4.55	4.94
		固形廃棄物(生産過程以外)	310.04	255.38	236.46
土壌へ					

(出所) 筆者作成

化学薬品の投入量とBOD、SSの排出量は、表5（影部分）で示したように、リサイクルが進めば進むほど、大きくなる。この結果と前節の総合評価には食い違いが生じている。そのためリサイクルを促進しようとするれば、これらの環境負荷因子をできる限り抑制する措置を考えなければならない。古紙パルプ化時に、清浄などの工程で大量な水が必要となるが、循環利用もできる。実際には、生産費用を節約するために、企業はできる限り水の循環利用を求めている。ただし、化学薬品の投入、溶けない異物などの発生によって、無制限の水循環は実現できない。それ故、廃水のBOD濃度とSS濃度が高くなる。

また、COの排出量とエネルギー生産過程による固形廃棄物の排出量については、いずれもリサイクルが促進されるほど小さくなる。そのためリサイクルの促進によりこれらの項目において、

環境負荷の低減効果が見られる。この分析結果によると、木材パルプの製造段階ではより多いエネルギーが必要だと考える。具体的に述べると、木材パルプの製造には、木材を破碎して除砂する工程があり、機械の稼働が多い。それに対して、古紙パルプの製造には、古紙を水に浸して蒸す工程などで、機械の稼働が必要ではない。ただし、蒸すためのエネルギー提供が要る。そのため、4.2.1節で示したようにエネルギーの消耗が「 $S1 > S2 > S3$ 」になると同時に、エネルギーを生産する過程で排出された固形廃棄物の量も同じ傾向となる。

## 5. おわりに

本研究では塗工白板紙のライフサイクルによる環境負荷を定量的評価した結果、環境保護の視点から総合的に言えば、紙リサイクルを進めたほうが、環境負荷が小さいと考えられる。

より詳細には、以下の通りである。

第1に、40%の古紙回収率の前提において、環境負荷を抑制するために順位をつけるとすれば、複数回循環リサイクル、一回循環リサイクル、リサイクルなしとなる。

第2に、環境負荷のカテゴリーでは、「エネルギー危機」、「地球温暖化」、「酸性化」、「富栄養化」、「廃棄物問題」（固形廃棄物の総排出）と「光化学オキシダント」の各カテゴリーで、リサイクルが進むほど、環境負荷の低減効果が大きくなる。

第3に、リサイクルを促進する場合、「資源枯渇」（水資源）、「大気汚染」、「水質汚濁」のカテゴリーにおいて環境負荷を引き起すため、それぞれの負荷因子を抑制する必要がある。例えば、生産工程にある水循環施設（汚水を回収して再利用するための措置）の技術、廃水と排気の末端処理技術を高めるなどが考えられる。

一方、本稿の分析には、3つの課題もある。一つ目は、汚染物の排出量等のデータが実測値ではないという点である。つまり、環境負荷への評価は過小評価となる可能性がある。二つ目は標本の大きさ（調査対象）が各1企業なので、代表性に問題があるかもしれない。統計が少ないため、分析結果は産業全体の生産技術を反映できていないという懸念が生じる。三つ目としては、LCIAの分析に採用された評価システムは、中国の研究機構で推薦されたものであるが、評価システムに統合できない環境負荷もあるため、各国で開発されたシステムによる評価結果と比較して、分析結果の感度点検を行う必要性が考えられる。それ故、これらを今後の課題として研究をより一層充実させていきたい。

## 参考文献

- 
- Goedkoop, M. 1995. *The Eco-indicator 95 NOH report 9523*. Netherlands: Pre consultants  
 Goedkoop, M. and Spriensma, R. 1999. *The Eco-indicator 99, a damage oriented method for life cycle impact assessment*. Netherlands: Pre consultants.  
 顾道金, 朱颖心, 谷立静. 2006. 「中国建筑环境影响的生命周期评价」『清华大学学报』46(12): 1953-1956  
 谷立静. 2009. 「基于生命周期评价的中国建筑行业环境影响研究」『清华大学土木工程专业博士论文』.

- 郭颖杰. 2003. 「城市生活垃圾处理系统生命周期评价」『大连理工大学环境系统工程专业硕士论文』.
- Heijungs R., Guinée J. B., Huppes G., Lankreijer R. M., Udo de Haes H. A., Wegener Sleeswijk A., Ansems A. M. M., Eggels P. G., Duin R. van, Goede H. P. 1992. *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds*. London: The Institute of Environmental Sciences.
- 平井康宏. 2003. 「物質循環・廃棄物 処理システムの統合評価手法の構築」『京都大学大学院博士論文』.
- International Organization for Standardization (ISO). 2006. *ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and framework*.
- 伊坪徳宏, 成田暢彦, 田原聖隆, 青木良輔, 稲葉敦. 2007. 『LCA概論 (LCA シリーズ)』. 産業環境管理協会.
- Karna A, Engstrom J, Kutinlahti T, Pajula T. 1994. Life cycle analysis of newsprint European scenario, *Paperi ja Puu*. 76(4): 232-237.
- 古紙再生促進センター. 2010. 『平成21年度古紙利用の環境に与える影響調査報告書』.
- 林逢春, 杨凯. 2004. 「两种一次性塑料餐盒的生命周期评价比较研究」『华东师范大学学报』(4): 122-130.
- 刘继永, 杨前进, 韩新民. 2008. 「瓦楞纸箱全生命周期环境影响评价研究」『环境科学研究』(6): 105-109.
- 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 何琴, 张浩, 姜睿, 陈雪雪, 侯萍. 2010. 「中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型」『环境科学学报』30(10): 2136-2144.
- 陆逊. 2010. 『造纸行业深度研究报告』北京大学证券投资协会出版.
- 吕耀平, 黄福群, 求渊, 王黎瑾. 2002. 「从LCA角度评价塑料制品与木制品对环境的影响」『环境污染与防治』24(6): 382-384.
- 中澤克仁, 桂徹, 庭田博章, 片山恵一, 坂村博康, 安井至. 2003. 「環境報告書用紙のライフサイクル・アセスメント」『紙バ技協誌』57(10): 1537-1549.
- Nigel D, Sue S, Jean-Paul J. 1996. *Pulp Fact: Environmental Implications of the Paper Cycle*. Switzerland: WWF International.
- Steen B. 1999. *A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) version 2000*. Chalmers University of Technology (Sweden): Center for Environmental assessment of products and material systems.
- 砂金光記. 1997. 「コピー用紙のLCA」『第80回電子写真学会討論会要旨集』: 69-72.
- 竹下登. 1989. 「BCTMP最近の技術動向」『紙バ技協誌』43(3): 284-296.
- Windsperger A, Steinlechner S, Simon A. 2002. *Life Cycle Management in the Pulp and Paper Industry*. Gate to EHS: life cycle management. 2(5): 1-10.
- 燕鹏飞, 杨军. 2007. 「一种改进的环境影响评价方法及应用」『环境与可持续发展』(5): 10-12.
- 杨建新, 王茹松, 徐成. 2002. 『产品生命周期评价方法及应用』气象出版社.
- 中国国家环境保护局, 中国国家质量监督检验检疫总局. 2008. 『制浆造纸工业水污染物排放标准 (GB3544-2008)』.
- 中国国家环境保护局, 中国环境科学研究院. 2010. 『第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册』.
- 中国环境保护部华南环境科学研究所. 2010. 『环境影响评价报告书』.
- 中国国家计划委员会, 中国财政部, 中国林业局. 2001. 『关于加快造纸工业原料林基地建设的若干意见』.
- 中国国家发展改革委员会. 2006. 『制浆造纸行业清洁生产评价指标体系』.
- 中国国家发展改革委员会. 2012. 『中国能源年鉴』. 科学出版社.
- 中国国家统计局. 2001-2013. 『中国环境统计年鉴 (2000-2012)』. 中国统计出版社.
- 中国造纸协会. 2012. 『中国造纸年鉴』. 中国轻工业出版社.
- 赵会芳. 2008. 「生命周期评价在促进造纸行业清洁生产中的应用」『黑龙江制纸』(1): 56-58.
- 庄瑛. 2007. 「杭州市城市生活垃圾综合处理方案研究」『浙江大学环境工程硕士论文』.

## 注

- 1) 木材, および竹や藁など非木材を指す.
- 2) 陆 (2010: 21) によると, 2010年塗工白板紙の生産量は全種類の包装用紙生産量の35.5%を占め, 生産量

が最も多い包装用紙である。

- 3) 中国は2008年から2010年にかけて、全国の産業汚染源、農業汚染源、生活汚染源と集中型汚染処理施設を全面的に調査した。その際、調査基準として認められたマニュアルが発行された。マニュアルに載せた各種汚染物の発生係数と排出係数は、一部が現場で観測した実測値であり、その他が類比法で測定されたものである。故に、現状を理解する上で信頼性が高いデータベースとして考えられる。
- 4) 製紙産業は環境汚染の発生源と認められるため、2003年の環境影響評価法によって、開業時あるいは拡張時、事前に環境影響評価を受けることが必要とされている。環境影響評価報告書には、対象企業の規模や技術などの条件に類似した企業の実績値がある一方、環境品質基準や汚染物排出上限値などの規制法令に基づいた推測値もある。また報告書の作成者は、国家環境保護総局の指定機構に所属する環境影響評価エンジニアで構成された専門家チームに限定している。故に、実際の観測データを取得できない場合は、信頼性があるデータベースとして評価されている。
- 5) CLCDによって、「DtT法」と「パネル法」という2種類のLCIAの統合方法が薦められた。「DtT法」は、『第十一次五か年計画』の目標に基づいて、各環境影響領域のそれらの政策目標値をもとに、削減幅が大きいほど重要な項目として扱う方法である。しかし、政策目標に定まった項目しか評価できないため、紙りサイクルによる主要な環境負荷因子を包括していない。つまり、対応項目もウェイトも不足であるため、本研究に適用できない。それに対して、中国専門家の知見によってウェイトが定まれた「パネル法」は、対応項目もウェイトも多くて、本研究の評価項目に適用する。そのため、本研究では「パネル法」の統合方法を採用した。
- 6) 現在利用可能な資源が今のペースで行くと何年で使えなくなるかということを指す。例えば、水の可採年数とは、現在のペースより淡水資源が何年で使えなくなるか、その年数を表すものである。